

# 에피박막 결함이 탄화규소 쇼트키 다이오드소자의 항복전압 특성에 미치는 영향

## Influence of the epitaxial-layer defects on the breakdown characteristics of the SiC schottky diode

정희중\*, 방 옥, 김남균, 김상철, 서길수, 김형우, 김은동, 이용재\*

(H.J. Cheong\*, W. Bahng, N.K. Kim, S.C. Kim, K.S. Seo, H.W. Kim, E.D. Kim, and Y.J. Lee)

한국전기연구원, 동의대학교\*

(KERI, Dong-Eui Univ.\*)

### Abstract

탄화규소 기판의 에피 박막결함으로는 dislocation, micropipe, pin-hole 및 에피층 표면의 여러 가지 결함들이 있다. 이러한 결함들이 탄화규소 쇼트키 다이오드의 항복전압과 어떠한 상관관계가 존재하는지 알아보기 위해 탄화규소 쇼트키 다이오드를 제작하고, 제작된 소자의 항복전압을 측정하였다. 에피 박막내의 결함 분포를 알아보기 위해 항복전압 측정 후 KOH 용액을 이용한 SiC의 에칭을 수행하였으며, 제작된 여러 소자들에 대해 항복전압의 분포도와 결함 분포도를 작성, 비교 관찰하였다.

**Keyword** : SiC SBD, Breakdown characteristics, Epitaxial-layer defects

### 1. 서 론

탄화규소(SiC: Silicon carbide)는 밴드갭이 넓은 반도체(wide bandgap semiconductor)재료 중의 하나이다. 반도체 재료로서 우수한 특성을 발휘하는 것은 4H-SiC와 6H-SiC로 구분된다. 4H 및 6H-SiC의 밴드갭은 각각 3.3, 2.8[eV]로 실리콘의 1.12[eV]와 비교해 볼 때 2~3배 정도 넓다. 그리고 탄화규소의 임계전계 값은 대략  $2\sim 3 \times 10^6$  V/cm 정도로 실리콘에 비해 10배가량 크기 때문에 동일한 항복전압을 가지는 소자를 제조할 경우 실리콘에 비해 낮은 비저항을 가지는 에피층이나 확산층을 사용해도 제조가 가능하며, 에피층의 두께 또한 실리콘에 비해 얇게 사용할 수 있다. 이외에도 탄화규소를 이용한 소자들은 고온 특성에 있어서도 실리콘에 비해 월등한 특성을 나타낸다[1]. 그러나 탄화규소는 산화막을 형성하기가 어렵고 표면에 dislocation, micro-pipe 및 pin-hole과 같은 결함들이 존재하는 등의 단점이 있으며, 이로 인해 소자의 제작에 많은 어려움이 있다.

MESFET과 같은 bulk 이동도를 사용하는 소자의 경우에는 제작이 비교적 용이하나 소자의 평탄화를 이루는데 문제가 있어 최근에는 표면 이동도를 이용하는 ACCUFET와 같은 소자들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, PiN diode나 수직형 MOSFET등에 대해서는 많은 연구가 진행되어 있다. 또한 쇼트키 다이오드의 경우에도 항복전압, 순

방향 전도특성 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 아직까지 표면결함에 따른 쇼트키 다이오드의 항복전압 변화에 관한 연구는 미미한 상태이다. 쇼트키 다이오드 경우 표면의 상태에 따라 내전압 특성이 더 많이 영향을 받기 때문에 이러한 결함의 영향이 더 클 것이다. 따라서 본 논문에서는 결함에 의한 쇼트키 다이오드의 특성에 미치는 영향, 특히 항복전압 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰 하였다.

### 2. 실험

실험에 사용된 wafer는 n-type으로, 저항이  $0.021 \Omega\text{-cm}$ 이고 두께가  $409.3 \mu\text{m}$ 인 기판위에  $5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 의 농도를 갖는  $10 \mu\text{m}$ 두께의 에피층을 가지고 있다. 이 기판의 경우 실질적인 소자의 특성에 영향을 주지 않으며 소자의 특성은 대부분 에피층의 농도와 두께에 영향을 받는다. Field oxide는 건식 산화기법을 사용하여  $500 \text{ \AA}$ 의 두께로 형성하였으며, 전계판의 overlap 길이는  $10 \mu\text{m}$ 로 하여 소자를 제작하였다. 역방향 항복전압을 측정하고, 소자의 금속전극막 부분을 식각하였으며, KOH 용액을 이용하여 결함의 국부적 식각을 시행하였으며, 광학현미경과 AFM을 이용하여 여러 가지 결함들을 관찰하였다.

그림 1은 제작된 탄화규소 쇼트키 다이오드를 나타낸 것이다. 실험에 사용한 시편은 2인치 규격의 웨이퍼를 1/4로 나누어 사용하였으며, 하나의

시편에 2가지 크기의 소자가 모두 배치 되도록 하여 제작하였다. 시편에는 500 $\mu\text{m}$ 크기의 소자 125개와 1000 $\mu\text{m}$ 의 크기의 소자 79개를 배치하였다. 본 실험에서는 결함을 관찰하기 위한 웨이퍼 에칭을 위해 각 소자를 패키징 하기 전에 chip상태에서 역방향 항복전압을 측정하였다.

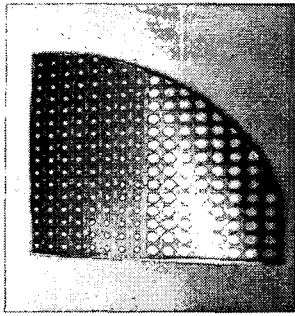


그림 1. 제작된 탄화규소 쇼트키 다이오드.

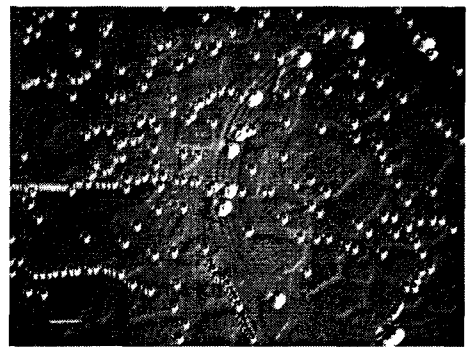
### 3. 결과 및 고찰

탄화규소의 경우 이론적으로 10 $\mu\text{m}$ 두께의 저농도 에피층을 사용할 때, 1000V 이상의 내전압을 구현할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그림 2에 역방향 항복전압분포를 측정된 결과를 나타내었다. 그림에서 중앙을 기준으로 왼쪽 부분은 지름이 500 $\mu\text{m}$ (A~H열), 오른쪽 부분은 지름이 1000 $\mu\text{m}$ (I~P열)인 다이오드를 나타내며, y축은 1~16번으로 각 소자 별로 번호를 매겨 놓았고, 격자의 교차하는 부분이 실제로 소자가 존재하는 자리이다. 그림에서 볼 수 있듯이 소자의 내전압은 위치에 따라 0~1200V 이상의 값을 가지고 분포하고 있다. 분포도에서 몇 개의 항복전압이 0V로 나타난 이유 중 하나는 웨이퍼를 식각한 후에 광학현미경으로 관찰한 결과 전계판 형성 시 이온주입이 되어지지 않아 발생한 것으로 보인다. 이러한 공정상 문제가 된 소자들은 분석에서 배제하였다.

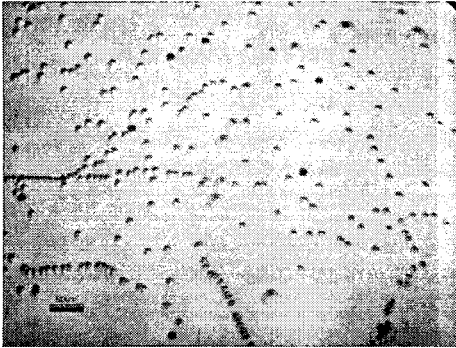


그림 2. 탄화규소 쇼트키 다이오드 역방향 항복전압 분포

최대 역방향 항복전압이 1000V 이상을 갖는 개수의 분포확률은 500 $\mu\text{m}$ 의 사이즈는 48%이고, 1000 $\mu\text{m}$ 의 사이즈는 35%로 전체를 기준으로 보았을 때 총 43.14%를 갖는다. 이 결과를 바탕으로 역방향 항복전압을 떨어뜨리는 요인으로 보여 지는 에피박막 결함 분포도를 작성하여 위 결과와 비교하기 위해, KOH를 550 $^{\circ}\text{C}$ 로 용액하여 9~10분 동안 식각을 하였다. 이렇게 탄화규소 웨이퍼를 식각하게 되면 그림 3에서와 같이 edged dislocations, screw dislocations과 micropipes등을 볼 수 있다. 현재 Cree사의 보고에 의하면 결정성장시 자연적으로 형성되는 결함의 개수는  $10^{16} - 10^{17}/\text{cm}^3$ 이다[2]. 본 실험에서 얻은 결과로는 etch pit의 밀도는  $10^4 - 10^5/\text{cm}^2$ 이며 micropipe-voids(darker pits)의 밀도는  $10^2 - 10^3/\text{cm}^2$ 이었다. 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 전계판이 형성되어 있는 곳에서 etch pit의 크기가 다른 곳에서의 etch pit의 크기보다 월등히 크다 이것은 전계판 형성 시 보론 이온주입을 한 결과 웨이퍼의 격자 결함[3]을 발생시켜 주변보다 큰 etch pit을 형성시킨 것으로 보인다. 이런 이유에도 불구하고 전계판 구조를 사용한 이유는 고내압 소자의 저농도층에서의 공핍층 형성 및 전계 분포는 소자의 깊이 방향보다는 가장자리부분에 집중되게 되므로, 이를 억제하기 위함이다[4]. 그리고 시편의 표면이 평탄하지 못한 것은 과도한 etching으로 인하여 발생한 것으로 보이며, 추후 보완 실험을 통해 적정 etching조건을 찾는 것이 필요하다.



(a)



(b)

그림 3. 광학현미경으로 촬영한 dislocations 과 micropipe voids(darker pits) (a) 반사 사진.

×200배 투과 사진 ×200배

여러 가지 결합 중에서 micropipe는 직경 수  $\mu\text{m}$  정도의 구멍이 기판으로부터 시작해 에피박막에 이르기까지 소자에 대해 수직방향으로 존재하는 것이다. 따라서 다른 전위들에 비해 큰 stress를 받고 있으므로 그림 3(a)에서와 같이 반사모드에서는 큰 구멍의 etch pit으로 관찰되고, (b)의 투과모드에서는 다른 전위들에 의한 결합과는 달리 깊은 구멍의 형태를 나타내게 된다.

여러 가지 결합들 중에서도 소자의 항복특성에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 micropipes (darker pits)의 개수와 SBD 역방향 항복전압과의 관계를 알아보기 위해 그림 5와 같이 micropipes(darker pits)의 위치별 분포도를 그려보았다. 그림 5에서 고려해야 할 사항은 앞에서 언급한 바와 같이 고내압 소자에서는 전계가 소자의 가장자리에 집중되는 것을 고려해 실제 전계판 가장자리에서 보다  $20\mu\text{m}$ 더 크게 설정하여, 고려할 면적은  $0.458\text{mm}^2$ (A~H열)과  $1.69\text{mm}^2$ (I~P열)에 존재하는 micropipes(darker pits) 개수를 관찰하였다. 광학 현미경을 이용한 여러 가지 결합의 관찰법은 여러 연구자들에 의해 보고된 바 있으나, 정확한 결합의 특성을 관찰할 수는 없는 단점이 있으므로 추후 X-ray topography등을 이용한 정밀한 결합 분석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 광학 현미경을 이용해서도 정확히 구별이 되는 micropipe의 분포를 위주로 관찰하였다.

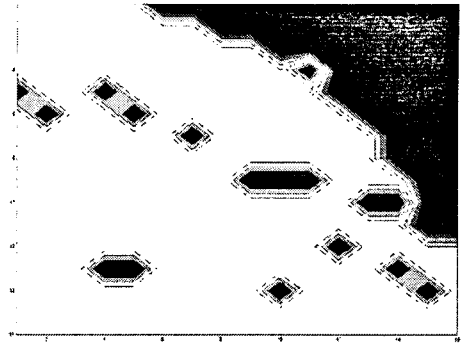


그림 5. micropipes의 분포도

다음으로 이들의 연관성을 확인하기 위해서 각 열(A~P열)별로 상관계수를 구해보았다. 상관계수의 공식은 식1.1과 표준편차의 공식 식1.2와 같다

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (\text{식 1.1})$$

$\bar{x}, \bar{y}$  : x, y의 평균값

$\sigma_x, \sigma_y$  : 표준편차

$$\sigma = \sqrt{\left\{ \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \right\} / n} \quad (\text{식 1.2})$$

상관계수  $r$ 은 항상 부등식  $-1 \leq r \leq 1$ 을 만족시키며, 양의 상관관계가 있을 때는  $r > 0$ , 음의 상관관계가 있을 때는  $r < 0$ 이다. 또 무상관일 때는  $r = 0$ 이 된다. 식 1.1에서  $n$ 을 쇼트키 다이오드의 개수,  $x$ 를 각각의 쇼트키 다이오드의 역방향 항복전압, 그리고  $y$ 를 micropipe의 개수로 대입하여 계산한 결과를 그림 6에 나타내었다.

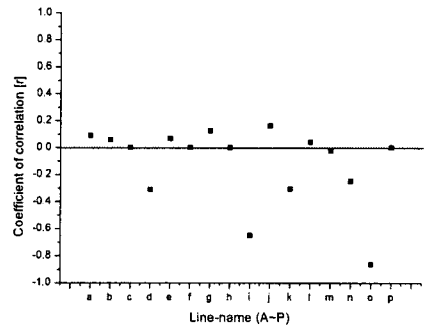


그림 6. micropipes의 개수 와 역방향 항복전압과의 상관계수

그림 6에서 보는 바와 같이 A~P열 중  $r > 0$  인 경우는 6열,  $r < 0$  인 경우는 6열이며  $r = 0$  인 경우는 4개의 열이 나타난다. 이 모든 열(A~P열)의 총 열(列)의 평균상관계수( $\bar{r}$ )는 -0.11568로 음의 상관계수로 얻어졌다. 따라서 micropipe가 존재하면, 쇼트키 다이오드의 역방향 항복전압을 감소시키는 요인으로 작용한다고 할 수 있다. 그리고 micropipe의 존재여부에 따른 전압변동률을 알아본 결과 micropipe가 존재 하지 않는 쇼트키 다이오드의 역방향 항복전압평균은 500 $\mu$ m와 1000 $\mu$ m가 각각 1002V 및 713V이고, micropipe가 존재 하는 쇼트키 다이오드의 역방향 항복전압평균은 각각 851V 및 663V로 전압변동률은 각각 15.12%와 7.0%로 총 평균 전압변동률은 11.1%로 나타났다.

이는 micropipe가 존재하면 Neudeck등[5]의 보고에서와 같이 수 $\mu$ m정도의 직경을 갖는 micropipe공간 내에 비교적 낮은 전압에서 microplasma가 발생하여 다이오드의 항복을 유발시키기 때문으로 생각될 수 있으며, 이 때 micropipe의 개수는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각할 수 있다. 즉, micropipe가 소자 내에 존재하면 그 개수와 상관없이 소자의 항복특성이 감소됨을 의미한다.

본 연구에서 micropipe가 존재하는 경우 항복전압의 감소율이 11.1%로 적은 값을 나타내는 이유는 항복전압 측정 시 고압에서 테스트가 이루어지는 경우이기 때문에 공기에 대한 노출을 막기 위해 불활성용액[1]에 충분히 잠기게 하여 측정을 하였기 때문으로 판단된다. Micropipe내에서의 microplasma의 발생을 관찰한 Neudeck등[5]의 경우에는 공기 중에서 내전압 측정을 하였기 때문에 micropipe의 존재 여부에 따라 소자의 항복전압이 큰 차이를 보였으나, 본 실험에서는 높은 항복전계를 갖는 불활성용액이 micropipe내에서의 microplasma발생을 감소시키는 효과를 나타내었기 때문에 micropipe가 존재하는 소자의 경우에도 다소 높은 항복전압 특성을 나타낸 것으로 보여진다.

이러한 효과를 보다 정밀하게 분석하기 위해서는 불활성용액의 사용여부에 영향을 받지 않는 기타 전위 및 적층결함 등에 의한 항복전압 특성 변화를 관찰 하여야 한다. 또한 micropipe 존재여부와 상관없이 소자의 면적증가에 따라 항복전압이 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 micropipe외의 다른 결함들이 항복전압 특성에 많은 영향을 주고 있음을 의미한다. 추후 X-ray topography등을 통

한 결함의 분석을 보완하여 이들의 영향을 고찰할 예정이다.

#### 4. 결론

Micropipes가 쇼트키 다이오드의 역방향 항복전압특성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 항복전압 분포와 결함 분포를 비교, 분석하였다. Micropipe가 존재하는 소자의 경우, 항복전압 특성이 11.1% 감소하는 것을 확인 할 수 있었으나 항복전압 특성과 micropipe 개수와의 상관관계는 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, micropipe의 존재 여부와 상관없이 소자의 면적증가에 따라 항복전압 특성이 나빠지는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 에피 박막 내에 존재하는 screw dislocation, edge dislocation, stacking fault등의 결함들에 의한 것으로 판단된다. 이러한 결함들에 의한 영향은 추후 보다 정밀한 분석이 요구된다.

본 연구를 통하여 SiC PiN 다이오드에서 소자의 특성을 가장 크게 악화시키는 micropipe 결함이 쇼트키 다이오드 소자에서도 가장 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 쇼트키 다이오드 소자의 경우 그 밖의 결함들에 의한 영향도 큰 것을 알 수 있었으며, 이에 대해서는 추후 보다 자세한 연구가 수행될 예정이다.

#### 참고 문헌

- [1] K. Schoen, J. Woodall, J. A. Cooper, "Design Considerations and Experimental Analysis of High-Voltage SiC Schottky Barrier Rectifiers", IEEE Trans. Electron Dev. 45[7] 1595-1604(1999).
- [2] Tsvetkov V. K. Henshall, D. N. Cree, "A theoretical and empirical perspective of SiC bulk growth". pp.89-99
- [3] M. V. Rao, George Mason Univ. "Maturing Ion-implantation Technology and its Device Applications in SiC", pp.519-22 SDRS'2001
- [4] G. Brezeanu, et al. "A Nearly Ideal SiC Schottky Barrier Diodes utilizing Metal Field Plated Termination", IEEE Trans. Electron Dev. 46[3] 456-64(1999).
- [5] Philp G. Neudeck, J. Anthony Powell, NASA "Performance Limiting Micropipe Defects in Silicon Carbide Wafers" IEEE Trans. Electron Dev. 15[2] 63-5(1994)

1) 불활성 용액(Fluorinert 3M) : 내전압이 46 KV, 비저항이 4.0 $\times 10^{15}$  $\Omega \cdot$ cm 인 불활성액체.